

Ville-Veikko Lemmetti

## UUSIUTUVAN ENERGIAN KAUSIVARASTOINTI

Sähkötekniikan koulutusohjelma

2014

# UUSIUTUVAN ENERGIAN KAUSIVARASTOINTI

Lemmetti, Ville-Veikko  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Marraskuu 2014  
Ohjaaja: Pulkkinen, Petteri  
Sivumäärä: 36  
Liitteitä:

Asiasanat: uusiutuva energia, kausivarastointi, terminen energia

---

Työn aiheeksi haluttiin ajankohtainen ja tulevaisuuden kannalta erityisen tärkeä aihe, jonka tiedoista saattaisi mahdollisesti olla hyötyä työllistymisen kannalta.

Opinnäytetyön tehtävänä oli tutustua ja tehdä katsaus uusiutuvien energialähteiden tärkeydestä, sekä tulevaisuudessa suuressa osassa olevien uusiutuvien energialähteiden termisen ja sähköisen energian varastointimenetelmistä.

Tietoja työhön etsittiin alan kirjallisuutta, verkkodokumentteja ja uutisia opiskellen. Erityisiä oppimisalueita työssä olivat oikeiden hakusanojen käyttö, sekä tiedon hankinta englannin kielisistä lähteistä.

Työn tuloksena tekijälle syntyi selkeä yleiskuva siitä, mitkä osa-alueet uusiutuvien energiamuotojen varastoinnissa ovat alkutekijöissään, ja mitkä ovat jo ottaneet pitkiä kehitysaskelia. Tulevaisuudessa työstä voi olla hyötyä uusiutuvaa energiaa jollain muotoa käsitteleville töille.

## SEASONAL STORAGE FOR RENEWABLE ENERGY

Lemmetti, Ville-Veikko

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in electrical engineering

November 2014

Supervisor: Pulkkinen, Petteri

Number of pages: 36

Appendices:

Keywords: renewable energy, season storage, thermal storage

---

The purpose of this bachelor thesis was to learn a subject, which is useful for the student in the future. Renewable energy season storage systems were interesting and motivating subject.

The main task was to familiarize oneself with importance of renewable energy sources and ways to store thermal and electrical energy. The sources that were used are from magazines, textbooks and internet. The most important matter was to use correct keywords.

As a result of the bachelor thesis the writer got extensive overview about weak and strong resources of the renewable energy storing. In the future this thesis's results can be used for example in other theses which deal with renewable energy.

.

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	FOSSIILISET POLTTOAINEET JA UUSIUTUVA ENERGIA.....	5
2.1	Fossiilisten polttoaineiden valtakausi tulossa päätökseen .....	5
2.1.1	Öljy .....	6
2.1.2	Kivihiili .....	7
2.1.3	Maakaasu .....	8
2.1.4	Ydinvoima .....	8
2.2	Uusiutuvien energiamuotojen tulevaisuus .....	9
2.2.1	Aurinkovoima .....	9
2.2.2	Tuulivoima .....	10
3	LÄMPÖENERGIAN KAUSIVARASTOINTI (STES) .....	10
3.1	Maanalainen lämpöenergiavarasto (UTES).....	11
3.1.1	ATES-järjestelmä .....	12
3.1.2	BTES-järjestelmä .....	13
3.1.3	CTES-järjestelmä .....	16
3.2	PTES-lämpövarastointi .....	17
4	SÄHKÖENERGIAN VARASTOINTI.....	18
4.1	Akut.....	18
4.1.1	Litium-akut .....	18
4.1.2	Natriumrikki-akut .....	19
4.1.3	Orgaaninen akku – ratkaisu sähkön varastointiin?.....	19
4.2	Pumppuvoimalaitos.....	20
4.3	Paineilmavarasto (CAES) .....	22
4.3.1	Kaupallisen käytön laitokset.....	22
4.3.2	Laitos-esimerkki .....	23
4.3.3	Eri sukupolvien voimalaitokset .....	24
4.4	Vauhtipyörä.....	25
4.4.1	Velkess-yhtiön tutkimustyö .....	26
4.5	Superkondensaattorit.....	27
4.6	Suprajohtava magneettinen energiavarasto (SMES) .....	28
4.7	Keskittävä aurinkovoima (CSP) .....	29
5	YHTEENVETO .....	31

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on pohtia tulevaisuudessa tapahtuvaa energiatuotannon muutosta, kun fossiiliset polttoaineet siirtyvät syrjään materiaalin loppumisen johdosta. Öljy-, kivihiili- ja maakaasuvarannot loppuvat maapallolta vääjäämättä tulevien vuosikymmenten aikana, ja uuden sukupolven haasteena on siirtyä energiatuotannossa uuteen aikaan, jota uusiutuvan energian muodot edustavat. Työn alussa luodaan lyhyt yleiskatsaus fossiilisten polttoaineiden hallitsemaan ylivaltaan nykyisen maailman energian tuotannossa ja kerrotaan miksi tulevaisuuden kaksi suurinta uusiutuvan energian toivoa; tuuli- ja aurinkovoima eivät ole toistaiseksi kokoaan suuremmassa asemassa.

Uusiutuvien energiamuotojen ongelmana on se, että johtavat energiamuodot; tuuli- ja aurinkovoima ovat ilmasto-olosuhteista riippuvia energialähteitä, sillä aina ei aurinko paista, tai tuuli puhalla haluttuun aikaan. Tämän vuoksi uusiutuvien energiamuotojen tuottamaa energiaa pitää saada varastoitua, ja käyttöön silloin, kun sitä tarvitaan. Tässä työssä käsitellään yleisimmät termisen energia ja sähköisen energian varastointimuodot ja tutustutaan konkreettisesti esimerkkikohteisiin.

Ensivaikutelmalta työ on haastava ja mielenkiintoinen jo siksi, että nopean tiedonhaun perusteella työhön ei löydy läheskään kaikkea materiaalia suomen kielellä, jolloin on pakko käyttää englannin kielisiä tietolähteitä.

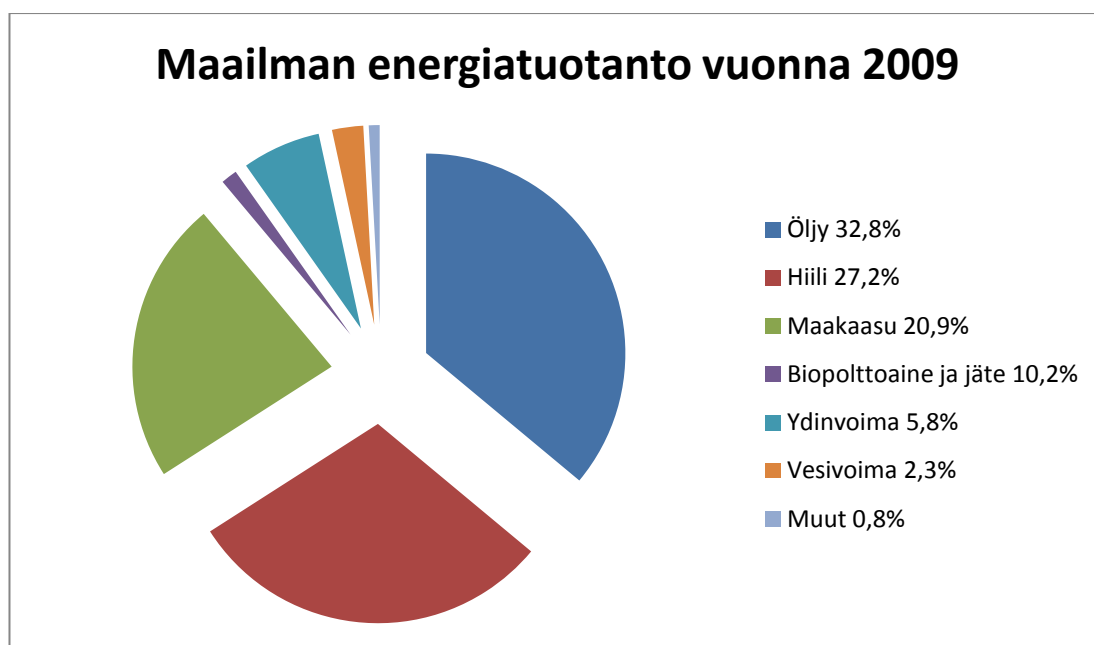
## 2 FOSSIILISET POLTTOAINEET JA UUSIUTUVA ENERGIA

### 2.1 Fossiilisten polttoaineiden valtakausi tulossa päätökseen

”Koko länsimainen kulttuuri perustuu siihen, että fossiilienergiaa riittää loputtomiin ja sitä on käytössä jatkuvasti enemmän. Kumpikaan oletus ei pidä paikkaansa.” /1/

Viimeiset 150 vuotta ovat olleet ihmiskunnan historiassa taloudellisen kasvun aikaa, kun ihminen on valjastanut halpoja fossiilisia energialähteitä käyttöönsä mielin määrin ja nostanut näin ollen hyvinvoinnin ja talouden ennennäkemättömälle tasolle. Halpa maakaasu, öljy ja kivihiili ovat asettaneet ihmisen aineellisen vaurauden tasolle, jota ei muutama vuosikymmen sitten osattu edes kuvitella. Tulevaisuudessa – ehkä jo hyvinkin pian ollaan tulossa tilanteeseen, jossa fossiilisten polttoaineiden tuotanto kääntyy laskuun. Kun näiden polttoaineiden tuotanto laskee, niiden hinta kääntyy nousuun. Valtaosa maailman energiantuotannosta nojaa fossiilienergiaan. /2/

Kuvio 1 Esittää energiantuotannon määrät vuonna 2009.



Kuvio 1. Energiantuotannosta noin 80% tulee fossiilisista polttoaineista. /29/

Tämä merkitsee halpaan energiaan tottuneelle yhteiskunnalle valtavia ongelmia. Jos talouskasvu fossiilipolttoaineiden hupenemisen myötä pysähtyy, miten käy hyvinvoinnin ja työpaikkojen? Uusia energialähteitä, ja niihin kuuluvia teknologioita on välttämätön kehittää ja ottaa käyttöön. /2/

### 2.1.1 Öljy

Öljy on raaka-aine, jota käytämme arjessamme päivittäin ja se ilmenee lähes jokaisessa päivän rutiinissa jollain muotoa. Aina elintarvikkeiden kuljetuksesta, sähkön tuotannosta, petrolipohjaisten kosmetiikkatuotteiden ja nailonista tehdyn vaatteiden käytöstä sotateollisuuden laitteiston liikutukseen – kaikkeen tarvitaan

öljyä. Perus raaka-aineena öljy on länsimaiselle kulttuurille välttämätön edellytys ja sen loppuminen todellinen kohtalon kysymys. /2/

Öljobisnes on arvoltaan maailman suurin bisnes, joten se herättää aina voimakkaita tunteita ja keskustelua. Suurin kysymys on öljyn jäljellä oleva määrä. Ongelmana määrän selvittämisessä on se, että öljy sijaitsee maan kuoren alla, sitä on monessa muodossa, ja kaikki mittausmenetelmät ovat summittaisia. Lisäksi öljykartelli on siirtynyt systeemiin, jossa öljyvarojen koko ratkaisee tuotantokiintiöiden koot – mitä suuremmat öljyvarat, sitä enemmän saa pumpata. Tämänkaltaisen systeemi rohkaisee häikäilemättömään arvioiden peukalointiin, jolloin öljyntuottajajärjestön jäsenvaltiot ja yritykset liioittelevat öljyvarantojensa kokoa. /2/

Milloin öljy sitten loppuu? Koska arviot ovat edellä mainituista syistä epätarkkoja, pitää seurata öljyn tuotantoa. Peak oil-keskustelussa väitellään siitä, että milloin öljytuotannon kasvu pysähtyy. Koska öljyä on rajallinen määrä, ja kulutus kasvaa koko ajan rajusti, tulee tulevaisuudessa väkisinkin eteen tilanne, jossa öljyä saadaan irti maan kuoresta vähemmän, kuin ennen. Kukaan ei tiedä tarkkoja arvioita öljyn loppumisen ajankohdasta, mutta kriittisimmät arviot kertovat öljyn tuotantopiikin olevan käsillä lähivuosina, ja optimistisimmat arviot ulottuvat tasaisen tuotannon nousun jatkuvan aina vuoteen 2030 asti. /2/

### 2.1.2 Kivihiili

Kaikesta maailmassa käytetystä energiasta kivihiili on alkulähde 30 prosentille kulutuksesta ja maailman sähkön tuotannosta 40 prosenttia syntyy hiilivoimalla. Öljyn tuotantohuipun tavoin hiilivoiman tuotantohuippua on arvioitu monelta eri taholta ja arviot hiilen määrästä ja riittävydestä heittävät suuresti. Fakta on kuitenkin se, että mikäli kivihiilen tuotantohuippu tulee edes karkeasti samaan aikaan, kuin öljytuotannon huippu, ovat seuraukset maailman talouden kannalta murskaavat. /2/

Kivihiilen määrää arvioidessa, päinvastoin kuin öljyllä, arvioidut määrät pienenevät jatkuvasti. Kysymys ei niinkään ole hiilen määrästä, vaan hyödynnettävissä olevan

hiilen riittämisestä vuosissa tulevaisuuteen. Propagandan ja epätarkkojen arviomittausten lisäksi arviointia hankaloittaa esiintymien sijainnit, hiilen laatu ja alati kasvava sähköntuotannon nousu. /2/

### 2.1.3 Maakaasu

Maakaasun positiivinen puoli on siinä, että sitä riittää huomattavasti pidemmälle ajalle, kuin öljyä ja hiiltä. Lisäksi sitä voidaan jalostaa sähkö- ja kaukolämpövoimaloiden käytön lisäksi ajoneuvojen polttoaineeksi. Päästötkin ovat huomattavasti pienempiä kuin kivihiilellä ja öljyllä. /2/

Maakaasun käytön ongelmat alkavat esiintymien huonosta sijainnista. Euroopassa ja Yhdysvalloissa maakaasua käytetään eniten, mutta suurimmat esiintymät ovat Lähi-Idässä ja Venäjällä. Kuljetus, käsitteleminen ja massiivisten siirtoputkien rakentaminen on kallista. Lisäksi kaasulinjojen rakentaminen aiheuttaa suurta vastustusta. /2/

Maakaasun valjastamista koko maailman energiatuotannon käyttöön hankaloittaa logistisen järjestelmän puute, jotta kaasua liikkuisi tarvittavia määriä tarvittavalla nopeudella. Öljytalouden rakentamiseen meni vuosisata, ja pitää muistaa, että maakaasukin on fossiilinen, eli joskus loppuva polttoaine. Herää kysymys, kannattaako uutta energiajärjestelmää rakentaa. Teknologian tutkimuskeskus VTT:n mukaan nykytuotannolla maakaasua riittäisi 60 vuodeksi. Tämäkin arvio on kuitenkin hyvin häilyvä, koska kysyntä tulee tulevaisuudessa kasvamaan rajusti. /2/

### 2.1.4 Ydinvoima

Kun mietitään ydinvoimaa näkökulmasta, että voisiko se korvata syrjään astuvia fossiilisia polttoaineita energian tuotannossa ja vähentää kasvihuonepäästöjä, on vastaus moniselitteinen. Kansainvälinen energiajärjestö IAE tutki vuonna 2010, että kun maailman sähköntuotannosta 13% tuotettiin ydinvoimalla, niin jos tämä määrä olisi tuotettu hiilivoimalla ilman ydinvoimaa, päästöt olisivat 17 prosenttia nykyistä



suuremmat. Tässä valossa ydinvoima tosiaan laskee päästöjä – tosin oltaisiinko kaikki korvaava kapasiteetti tuotetta hiilellä, se jää arvailujen varaan. /2/

Ydinvoiman lisäämisen ongelma ydinjätteen tuoton ja onnettomuusriskien lisäksi on sen valtavat kulut ja piilohaitat. Esimerkiksi ydinvoimaloiden ydinjätteiden loppusijoituspaikkojen rakentaminen vaatii valtavasti betonia ja terästä, joiden valmistaminen aiheuttaa suuria päästöjä. Lisäksi uraanin louhimiseen ja rikastamiseen kuluu energiaa, varsinkin kun hyvälaatuiset uraaniesiintymät ehtyvät ja joudutaan käyttämään huonolaatuisempaa uraanimalmia. Itse louhinta vapauttaa ilmakehään kasvihuonekaasuja. /2/

## 2.2 Uusiutuvien energiamuotojen tulevaisuus

### 2.2.1 Aurinkovoima

Aurinkoenergia tulee tulevaisuudessa olemaan epäilemättä yksi johtavista uusiutuvan energian muodoista, sillä se on ehtymätön energian lähde. Kun biokaasun ja tuulivoiman käytössä on maisemaan, maankäyttöön tai päästöihin liittyviä ongelmia, ei aurinkoenergialla näitä ongelmia ole. Aurinkoenergian käyttöä on kuitenkin toistaiseksi haitannut teknologian hinta, laitteiden huono hyötysuhde, sekä vaihtelevat sääolot. Kysynnän ja tarjonnan välillä piilee myös ristiriita: pohjoisessa tarvitaan eniten energiaa silloin, kun sitä ei saada auringosta, ja etelässä päinvastoin. Tämän vuoksi aurinkoenergia tuottaa maailman energiantuotannossa vain promillen murto-osia. Silti aurinkoenergian kasvun odotetaan olevan suurta. /2/

Lupaavin tekniikka aurinkoenergian massatuotannon saralla on keskitettävä aurinkoenergia-, eli CSP-tekniikka. Perusideana on, että auringon säteet kerätään yhdeksi kimpuksi peilien avulla, ja suunnataan johonkin väliaineeseen, kuten suolaveteen, tai öljyyn. Polttopiste voidaan sijoittaa esimerkiksi torniin peilikentän keskelle. Väliaine, joka kuumennetaan usean sadan asteen lämpötilaan, ohjataan perinteiseen turbiiniin, joka tuottaa sähköä. Eri arvioiden mukaan CSP-tekniikalla voitaisiin kattaa vuoden 2050 sähköntuotannosta jopa 15-25 prosenttia. /2/

### 2.2.2 Tuulivoima

Tuulivoiman kasvu on maailmalla ollut merkittävää vuosien 2000 - 2010 välillä. Se on kasvanut 60 kertaisesti ja kasvaa 20 prosentin vuosivauhtia. Pelkästään Kiinassa vuonna 2011 rakennettiin 18 000 MW:n edestä tuulivoimaa. Kolmen megawatin tuulivoimaloina se tarkoittaisi 6000 uutta tuulimyllyä. Kokonaiskapasiteetti maailmalla on 240 000 MW, joka tarkoittaa n. prosenttia koko maailman sähköntuotannosta, joten merkittävien määrien tuottamiseen on vielä matkaa. /2/

Tuulivoimaloiden ongelmana on sääriippuvuuden lisäksi niiden vaatimaton teho suhteessa itse voimalan kokoon. Turbulenssien vuoksi suurissa tuulivoimapuistoissa olevat tuulimyllyt eivät voi olla kovin lähellä toisiaan, joten vaadittava tila tehokkaalle puistolle on valtava. Jos esimerkiksi haluttaisiin korvata Meri-Porissa sijaitseva 560 megawatin hiilivoimala tuulienergialla, tarvittaisiin 600 tuulivoimalaa, ja niille 300 neliökilometrin alue. Muun muassa tämän takia tuulivoimaa pyritään sijoittamaan merelle, jossa voimalat eivät ole kenenkään tiellä. /2/

## 3 LÄMPÖENERGIAN KAUSIVARASTOINTI (STES)

Lämpöenergian kausivarastointi (Seasonal thermal energy storage, STES) on termi monelle eri teknologialle varastoida termistä energiaa useiksi kuukausiksi. Lämpöenergiaa voidaan kerätä aina, kun sitä on saatavilla, ja käyttää silloin kun sitä tarvitaan. Yleensä tarvitaan varastoitua kylmää energiaa kesäaikaan ja lämpöä talviaikaan. Esimerkiksi aurinkokeräimen lämpö, tai hukkalämpö ilmastointijärjestelmän laitteistosta voidaan kerätä talteen lämpiminä kuukausina, ja käyttää tilojen lämmitykseen kylminä vuodenaikoina. Myös talven luonnollinen kylmyys saadaan varastoitua kesän ilmastointitarkoituksia varten. Kausivarastoinnissa lämmitykseen tarkoitetun varastoidun lämmön lämpötila on yleensä 27 - 80 Celsius-asteen välillä ja varastossa oleva lämpötilaero voi olla vuoden aikana useita kymmeniä asteita. Jotkut järjestelmät käyttävät lämpöpumppua apuna erilaisten varastojen lämpövaraamisessa tai viilennyksessä. Joissain

järjestelmissä tämä tapahtuu tiettyinä ajanjaksoina, joskus taas ympäri vuoden. Jäähdytyskäytössä apulaitteena käytetään yleensä vain ilmaa kierrättävää pumppua. STES-tekniikoita voidaan käyttää aina pienestä yksittäisestä rakennuksesta isoihin kommuuneihin asti. /3/

### 3.1 Maanalainen lämpöenergiavarasto (UTES)

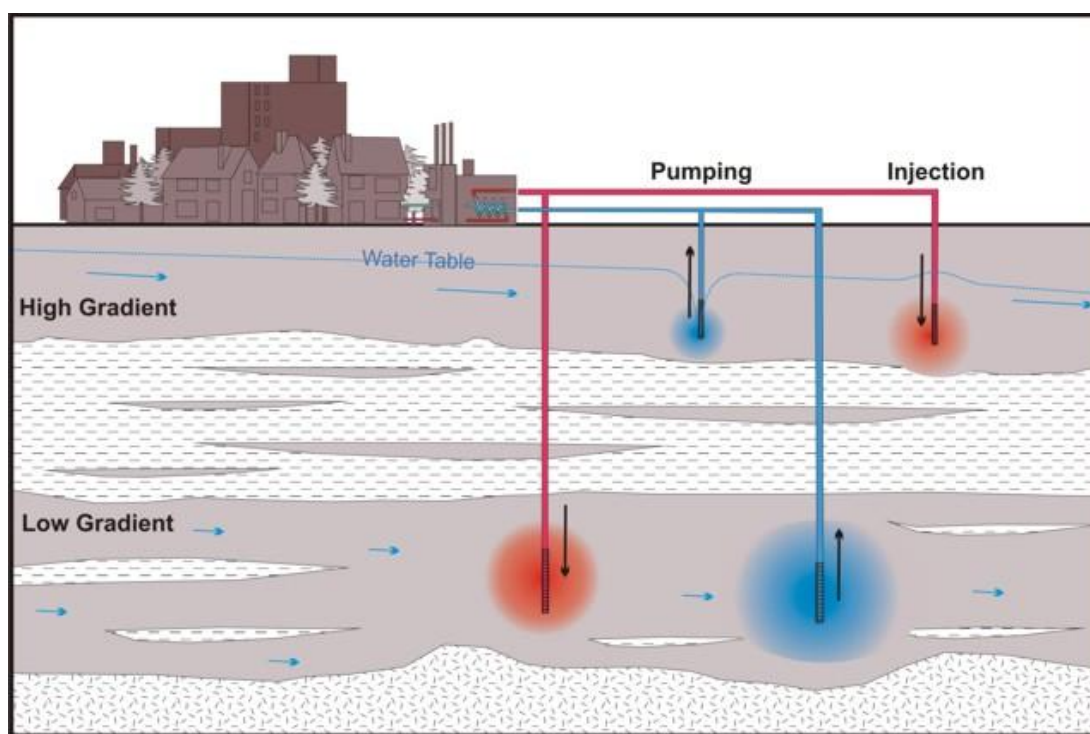
UTES (Underground Thermal Energy Storage) on lämpöenergian varastoinnin muoto, joka mahdollistaa suurella skaalalla kylmän ja kuuman lämpöenergian varastointia maan alle luonnollisessa maaperässä. On olemassa teollisuuden järjestelmiä, jotka ottavat jäähdytykseen käyttämänsä veden syvien järvien pohjasta, johon luonnon kiertokulussa jäähtynyt raskas vesi on vajonnut. UTES-järjestelmä eroaa edellä mainituista siten, että se on aktiivinen termisen energian varasto. Maan alle sijoitettava varasto on sopiva lämmönvarastointiin siksi, että sillä on korkea terminen jatkuvuus. Maan alla 10-15metrin syvyydessä ilmaston sääolojen vaihtelujen vaikutus varaston lämpötilaan on hyvin vähäinen ja se ylläpitää tasaisen lämmön hieman yli paikallisen vuotuisan keskilämpötilan. Suuri varastointikapasiteetti luonnolliselle maanalaiselle paikalle tekee UTES-lämpövarastoinnista kannattavan järjestelmän lämpöenergian pitkäaikais- ja kausivarastointiin. Maanlaiseen lämpöenergiavarastoon pystytään tehokkaasti varastoimaan vallitsevan vuodenajan termistä energiaa niin talvi- kuin kesäkäytössä. Lisäksi aurinkoenergian, teollisuudesta sivutuotteena tulevan lämpöenergian, sekä jäähdytysjärjestelmien viileän ilman terminen energia saadaan pitkälle aikavälille varastoitua. Kun varastosta tarvitaan termistä energiaa, järjestelmä voi syöttää sitä tilojen lämmitykseen/viilennykseen, tuuletuksen esilämmitykseen/-jäähdytykseen ja prosessien jäähdytykseen. /4/

UTES-järjestelmien kolme yleisintä muotoa ovat:

- ATES (Aquifer Thermal Energy Storage)
- BTES (Borehole Thermal Energy Storage)
- CTES (Cavern or Mine Thermal Energy Storage) /5/

### 3.1.1 ATES-järjestelmä

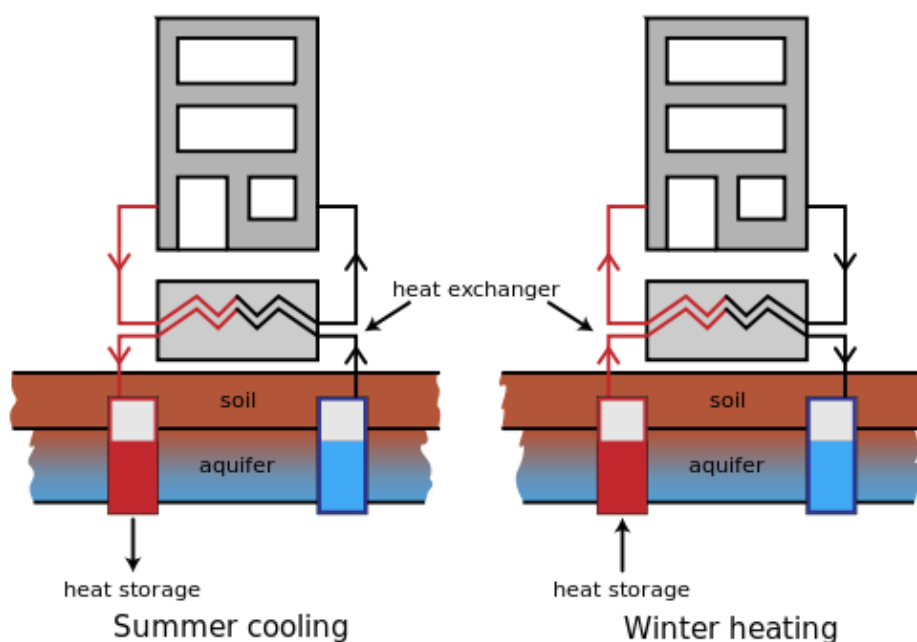
Aquifer Thermal Energy Storage, eli ATES-järjestelmä on avosilmukkinen energian varastointijärjestelmä, joka varastoi termistä energiaa pohjaveteen ja sen akvifereihin, eli pohjavesikerroksiin. Järjestelmän periaate huomattiin sattumalta Kiinassa, kun kalliota poratessa kylmä vesi tunkeutui pohjavesikerroksista liiallisesta maaperän louhinnasta johtuneiden maan vajoamisten takia. Havaittiin, että vesi oli pysynyt kylmänä pitkiä aikoja. ATES-järjestelmässä pohjavesi on termisen energian kantoaineena ja terminen energia voidaan johtaa akvifereihin, ja ottaa sitä niistä. Näin kontrolloidaan pohjaveden lämpöä ja virtaussuuntaa. /4/ Pohjavesikerroksen, eli akviferin ylä- ja alapuolella on oltava läpäisemätön geologinen kerros. /5/ Kuvassa 1 havainnollistetaan kylmä- ja lämminvesi kaivoja.



Kuva 1. Kylmä- ja lämminvesikaivot /30/

ATES-järjestelmään kuuluu vähintään yksi kylmä ja yksi lämmin kaivo kytkettynä läpi hydraulipumpun ja lämmönvaihtimen. Mikäli halutaan kasvattaa energiavaraston kapasiteettia, voidaan samanlaisen termisen energian kaivoja (kylmiä tai kuumia) yhdistää keskenään, ottaen kuitenkin huomioon niiden varastointikyky, eli koko ja lämpötila. Kylmät ja lämpimät kaivot pitää olla erotettuna tarpeeksi kauas toisistaan, jotta voidaan ehkäistä terminen läpimurto, eli kylmän ja lämpimän veden

sekoittuminen keskenään. Kausivarastointi-järjestelmissä kaivojen etäisyys pitää olla suurempi, kuin matka, jonka termisen energia virtaa tietyn pohjavettä sisältävän kerroksen läpi yhden varastointijakson aikana. Pohjavesi pumpataan syöttävästä kaivosta kysynnän aikaan, ja lämmönvaihtimet siirtävät pumpatusta pohjavedestä termisen energian lämmitys/viilennys-järjestelmän käyttöön. Lämmönvaihtimessa käynyt jäähdyttävä, tai lämmittävä vesi siirretään käyttötarkoituksesta riippuen joko kylmän, tai lämpimän veden kaivoon. Kuva 2 osoittaa kaivojen toimintaperiaatteen.



Kuva 2. Akvifäärikaivojen periaatekuva. /31/

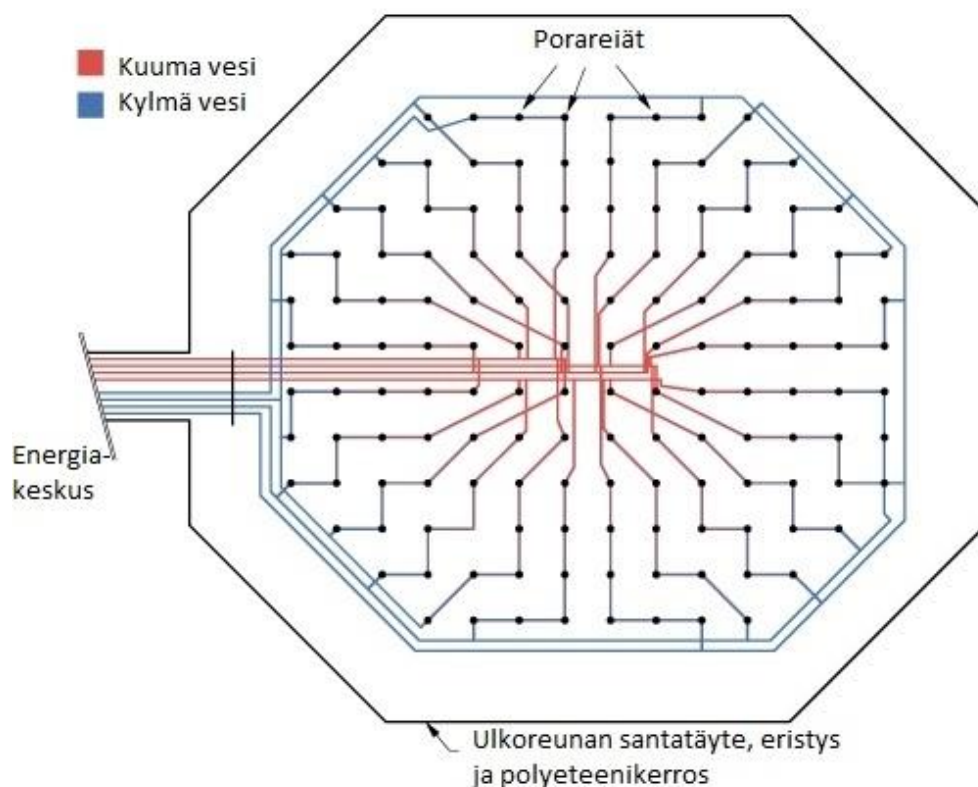
Kesällä jäähdytysjärjestelmässä lämmennyt kylmän kaivon vesi siirretään jäähdytysprosessin jälkeen lämpimän veden kaivoon ja käytetään talvella lämmitykseen. /4/

### 3.1.2 BTES-järjestelmä

Borehole Thermal Energy Storage-järjestelmän varastoja voidaan asentaa mihin tahansa maaperään, johon voidaan porata reikiä. Järjestelmä voi koostua yksittäisistä, tai useista sadoista porakaivoista. /4/

BTES:n idea on porata maa-alueelle reikiä, joihin asennetaan lämmitysputkisto. Putkissa virtaa neste, jota kesäaikaan lämmitetään aurinkoenergialla. Aurinkokeräimien lämmittämä neste virtaa putkilinjaa pitkin maan sisään asennettuihin putkisilmukoihin, jotka ovat asennettuna erillisiin suojaputkiin. Putkisilmukassa kulkiessaan neste luovuttaa termistä energiaa ympäröivään maa-ainekseen. Tällöin maa varastoi aurinkoenergian tuottamaa lämpöä maankuoreen, jolloin se toimii käytännössä katsoen valtavana, koko porauskentän laajuudelta toimivana lämmönvaihtimena. Lämpöverkostoon kytketyt talot käyttävät talvella kiertovettä, joka lämmitetään maankuoreen varastoituneella termisellä energialla. Työssä käytetään esimerkkinä Kanadan Albertassa, Okotoksin kaupungissa sijaitsevaa yhteisöä, jossa talot lämmitetään BTES-järjestelmällä. /6/

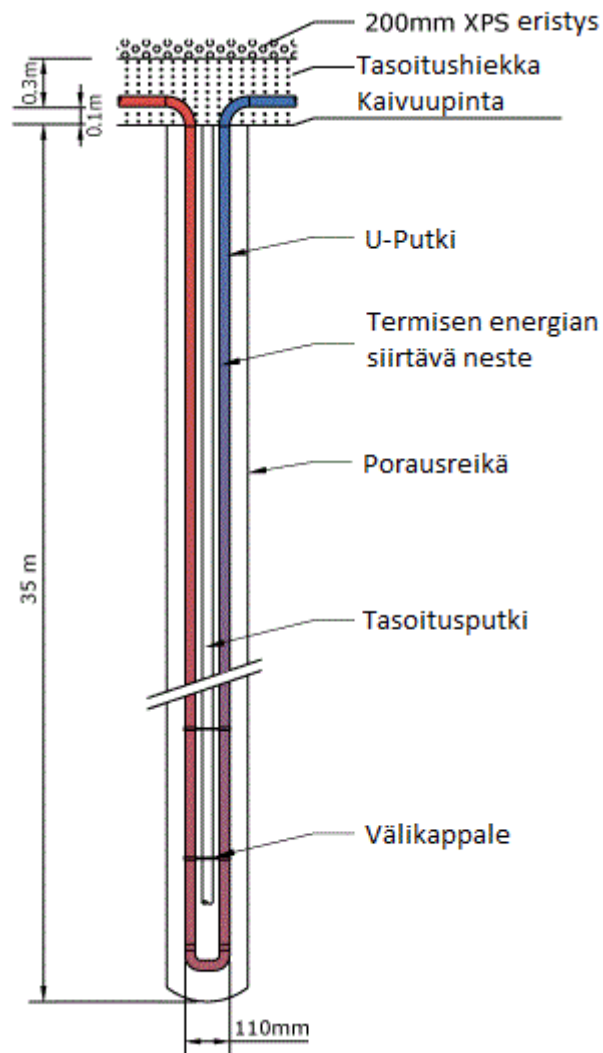
Kuva 3 havainnollistaa lintuperspektiivistä lämpökentän reiät ja putkiston rakenteen.



Kuva 3. Porakaivokenttä, ja reikien ketjutus. Lämmitysputket tulevat järjestelmän energiakeskuksen kautta. /32/

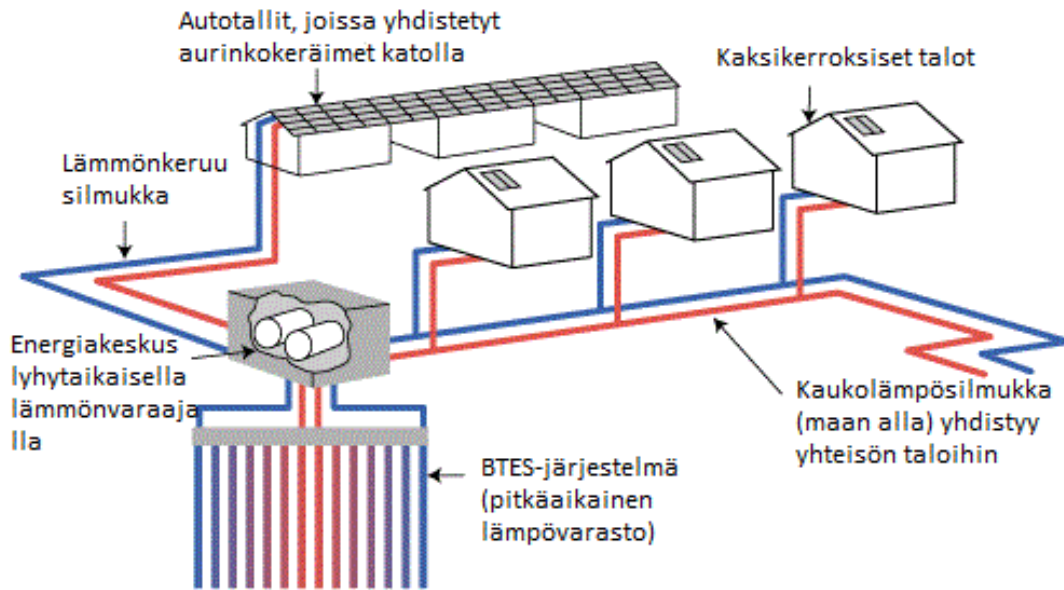
Kun siis vakio kokoiset reiät on porattu, reikiin asetetaan muoviputki, joka sisältää järjestelmän silmukkaputken. Silmukkaputkea, jossa termistä energiaa kuljettava

neste virtaa kutsutaan U-putkeksi. /6/ Kuva 4 näyttää halkileikkauksen yhdestä porareikään asetettavasta järjestelmän U-putkesta.



Kuva 4 Lämmönsiirtoputken halkileikkaus. /32/

Kun silmukkaputki on asennettu, porakaivo täytetään korkean johtokyvyn omaavalla injektointiaineksella. Esimerkkijärjestelmän porakentälle on porattu 144 porakaivoa, jotka yltyvät 37metrin syvyyteen. Yhden porakaivon leveys on n. 150mm. Reiät on porattu verkostoksi, jossa ne ovat 2,25metrin etäisyydelle toisistaan. Kenttä on halkaisijaltaan 35metriä leveä. Pinnalla U-putket yhdistetään toisiinsa kuuden sarjoihin siten, että linja alkaa keskeltä ja menee kentän ulkoreunaa kohti palaten jälleen energiakeskukselle. Koko BTES-kentän päällinen on peitetty eristekerroksella, sitten maa-aineksella, ja tämän jälkeen maisemoitu puistoksi. /6/ Kuva 5 näyttää koko järjestelmän rakennekuvan.



Kuva 5. BTES-järjestelmän lämmittämä asuinyhteisö. /33/

Kun aurinkokeräimillä lämmitetty vesi on tarpeeksi lämmintä, se pumpataan kohti porakentän keskiosaa läpi U-putkilinjan. Lämpö siirtyy putkistolinjoja ympäröivään maa-ainekseen. Virratessaan kohti porakentän reunaa se vähitellen viilenee ja palaa sitten energiakeskukselle. Sitä vastoin, kun taloissa halutaan lämpöä, kaukolämpölinjan vesi pumpataan reunoilta kaukolämpösilmukkaa pitkin kohti porakentän keskustaa ja sieltä edelleen energiakeskuksen lyhytaikaisen lämmönvaraajan läpi taloon, ja näin lämpöenergiaa saadaan siirrettyä taloihin. /7/

Vaikka Albertassa on lämmin aurinkoinen ilmasto, vei varaston lämpeneminen silti kolme vuotta. Ensimmäisinä vuosina BTES-järjestelmä toimii suhteellisen alhaisilla lämpötiloilla ja kierrätettävä energia tulee tyhjennettyä järjestelmästä ennen lämmityskauden loppua. Joka tapauksessa muutaman vuoden käytön jälkeen BTES-järjestelmän porakenttä tulee saavuttamaan 80 Celsius-asteen lämpötilan kesän lopulla, ja tuottaa riittävästi lämpöä lähes koko lämmityskauden ajan. /6/

### 3.1.3 CTES-järjestelmä

Termisen energian kausivarastointi on mahdollista vedellä täytettyihin kaivoksiin, tarkoituksella rakennettuihin kammioihin, tai hylätyihin maanalaisiin



öljyvarastoihin, mikäli ne ovat tarpeeksi lähellä lämmön tai kylmän lähdettä, sekä termistä energiaa käyttävää kuluttajaa. /5/

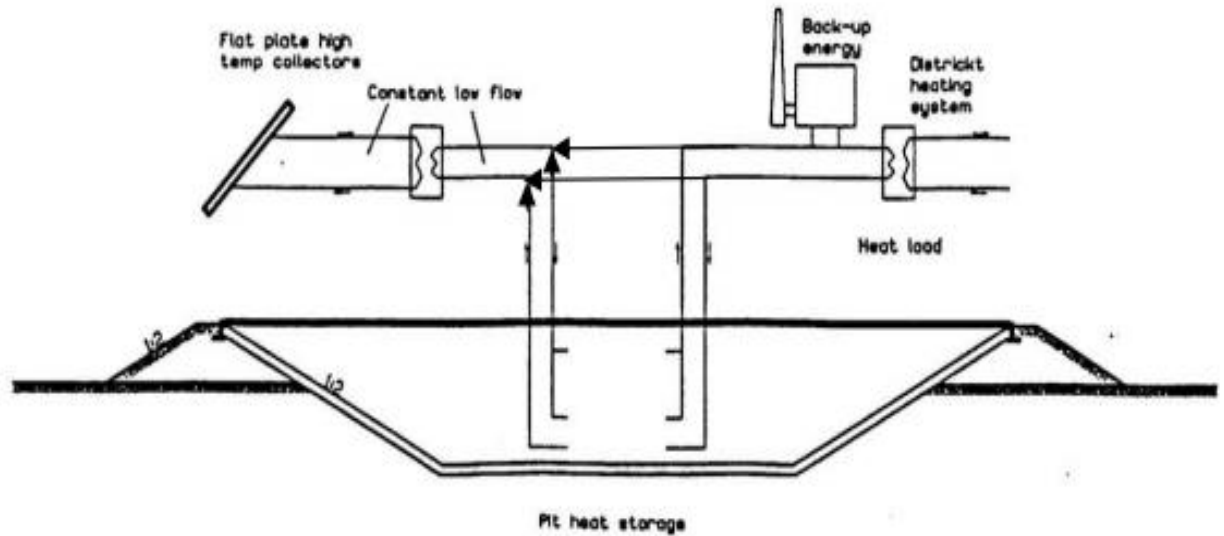
Maailmassa on tällä hetkellä vain muutama kalliossa oleva CTES-varastointijärjestelmä. Yksi niistä sijaitsee Oulussa. Tämä ”lämpöakku” koostuu kahdesta rinnakkaisesta kallioluolasta, jotka ovat vanhoja Kemiran öljyvarastoja. Nykyään luolat ovat täytetty vedellä ja yhdistetty Toppilan lämpövoimalaitokseen. Luolat ovat käytössä Kemiran hukkalämmön kausivarastoinnille ja lyhytaikaisena energialähteenä Oulun kaupungin kaukolämpöjärjestelmään. /8/

Kausivarasto on Oulun kaupungille erittäin tärkeän etenkin kesällä, kun Toppilan voimalaitos pysäytetään vuosihuollon aikaan, jolloin puolet koko Oulun kaukolämpöverkosta lämpeää luolaston lämpöakusta. /9/

### 3.2 PTES-lämpövarastointi

PTES, eli Pit Thermal Energy Storage-varastointijärjestelmässä lämpöä säilötään maassa oleviin kuoppiin. Kuopat yleensä kaivetaan maahan, ja reunustetaan läpäisemättömillä muovisilla seinämillä. Kuoppa täytetään vedellä ja peitetään eristävällä katolla. PTES-järjestelmä muistuttaa lähinnä suurta peitettyä uima-allasta. Järjestelmä toimii kuin suuri varaajatankki. /10/

Kuopassa oleva vesi lämmitetään jostakin lämmönlähteestä, esimerkiksi aurinkoenergialla lämmönvaihtimen avulla. Hyvin eristettynä kuoppa pystyy pitämään lämpötilansa kaudesta toiseen. Mikäli lämpöä kuopan veteen tarvitaan lisää, sitä voidaan johtaa kuoppaan lämpöpumpulla. Lämmön siirtäminen kuopasta eteenpäin tapahtuu toisella lämmönvaihtimella. PTES-järjestelmää on käytetty hyvin paljon Tanskassa kesän aurinkoenergian lämpövarastoinnin hyödyntämiseen talvella kaukolämpöjärjestelmissä. /10/ Kuva 6 selventää PTES:n toimintaperiaatetta.



Kuva 6. PTES-järjestelmän toimintaperiaate. /34/

## 4 SÄHKÖENERGIAN VARASTOINTI

### 4.1 Akut

Perinteisen akun sähkökemiallinen varastointi perustuu hapettumis-pelkistymisreaktioon. Akun toimintaperiaate siis yksinkertaisuudessaan on varastoida sähköenergiaa sähkökemialliseen muotoon ja akkua purettaessa päinvastoin. Akkujen teknologiat poikkeavat toisistaan elektrolyyttiaineen ja elektrodien materiaalien mukaan. /11/ Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan kahta yleisintä uusiutuvan energian varastointiin käytettyä akkutyyppeä. Lisäksi tarkastellaan Yhdysvaltain energiaviraston rahoittamaa hanketta orgaanisesta akusta.

#### 4.1.1 Litium-akut

Litiumioniakkuja on monenlaisia. Pääperiaatteena litiumioniakuissa on, että litiumionit liikkuvat anodilta katodille elektrolyyttiliuoksessa, kun akkua puretaan. Riippuu akkutyypistä millainen hinta, materiaali, kemiallinen reaktio ja turvallisuus ovat. Litium-akkuja käytetään lähinnä pienissä sovelluksissa, kuten sähköautoissa ja sähköverkon taajuuden säätelyssä. Suurimmat ongelmat laajamittaisen litium-

akkujen käyttöön sähköverkoissa ovat sen puutteellinen käyttöturvallisuus ja edullisen rakenneratkaisun löytäminen. Lämpimissä käyttöolosuhteissa mahdollinen ylikuumeneminen on suuri riski räjähdysvaaran takia. Lisäksi suuren kokoluokan akut ovat erittäin hintavia (yli 600USD/kW). Mikäli litium-akuista tulee sähköautojen johtava teknologia, saattavat litium-akkujen kustannukset laskea merkittävästi. /11/

#### 4.1.2 Natriumrikki-akut

Natrium-akkujen toiminta perustuu natrium-rikkireaktioon, joka vaatii korkeita lämpötiloja. Ne soveltuvat hyvin tuuli- ja sähkövoimalaitosten energiavarastointiin, mutta niiden haittapuolena on vaadittu korkea lämpötila, sekä huono käyttöturvallisuus. /11/

Natrium-akkuja voidaan käyttää esimerkiksi tuulivoimapuistojen ja aurinkovoimalaitosten yhteydessä. Tuulivoimapuistojen yhteydessä akkuja ladataan tuulisena, matalan kuormituksen ajanjaksona, ja energiaa käytetään akuista korkean sähkön kulutuksen aikaan. Natriumrikki-akusto on hyvä ratkaisu avustamaan sähkövoimalaitoksen huippukulutusjaksoja sellaisiin olosuhteisiin, joihin ei voida rakentaa pumppuvoimalaitoksen, tai paineilmavoimalaitoksen kaltaisia energiavarastoja, jotka vievät valtavasti tilaa. /12/

#### 4.1.3 Orgaaninen akku – ratkaisu sähkön varastointiin?

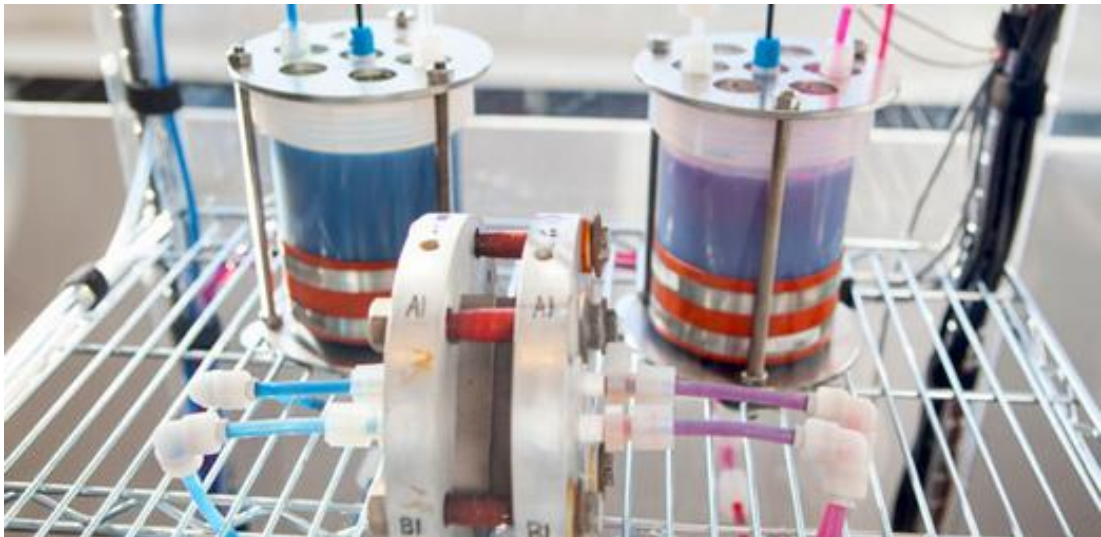
Yhdysvaltojen energiavirasto rahoitti hiljattain hanketta, jossa kehitetään akkuteknologiaa, joka veisi aurinko-, tuuli- ja vesisähkön varastointiin sähköverkkotasolle. Tämä mahdollistaisi uusiutuvien energialähteiden käytön aivan uudessa mittakaavassa.

Edullinen ja metallivapaa virtausakkuteknologia perustuu tutkijoiden mukaan kinonimolekyylien elektrokemiallisiin ominaisuuksiin. Teknologiassa jäljitellään luonnon prosesseja – esimerkiksi kasveista löytyy energian varastointiin käytettäviä kinonien tapaisia molekyyliä.

Suuria määriä sähköenergiaa varastoivien akkujen suunnittelu on aina perustunut kalliiden kemikaalien, kuten vanadiumin ja platinan hyödyntämiseen. Uusi kehitetty akku on jo ominaisuuksiltaan vanadium-akun tasolla, ja täysin metallivapaalla rakenteella.

Virtausakun energia säilötään itse varsinaisen akun ulkopuolella oleviin tankkeihin. Neste virtaa tankkien välillä muuntimen läpi, jossa sähköenergia muutetaan kemialliseen muotoon. Kun energiavarasto akussa myöhemmin puretaan, neste virtaa toiseen suuntaan ja muuttaa kemiallisen energian sähköenergiaksi. Ainoat rajoitukset varastoitavan energian määrälle on akun tankkien koko, ja syöttävän energialähteen teho. Tästä johtuen teknologialla on mahdollisuus varastoida edullisesti suuria määriä energiaa.

Tutkijoiden mukaan uusi teknologia sopisi myös yksittäisen kiinteistön energiavarastoksi. Normaalikokoisen öljysäiliön tilan vievä virtausakkulaitteisto riittäisi aurinkopaneeleja hyödyntävän omakotitalon energiavarastoksi öitä ja pilvisiä päiviä varten. Kuva 7 Näyttää laboratorio-kehitelmän akkuteknologiasta. /13/



Kuva 7. Virtausakun säiliöt voivat käytännössä katsoen olla minkä kokoiset tahansa. /35/

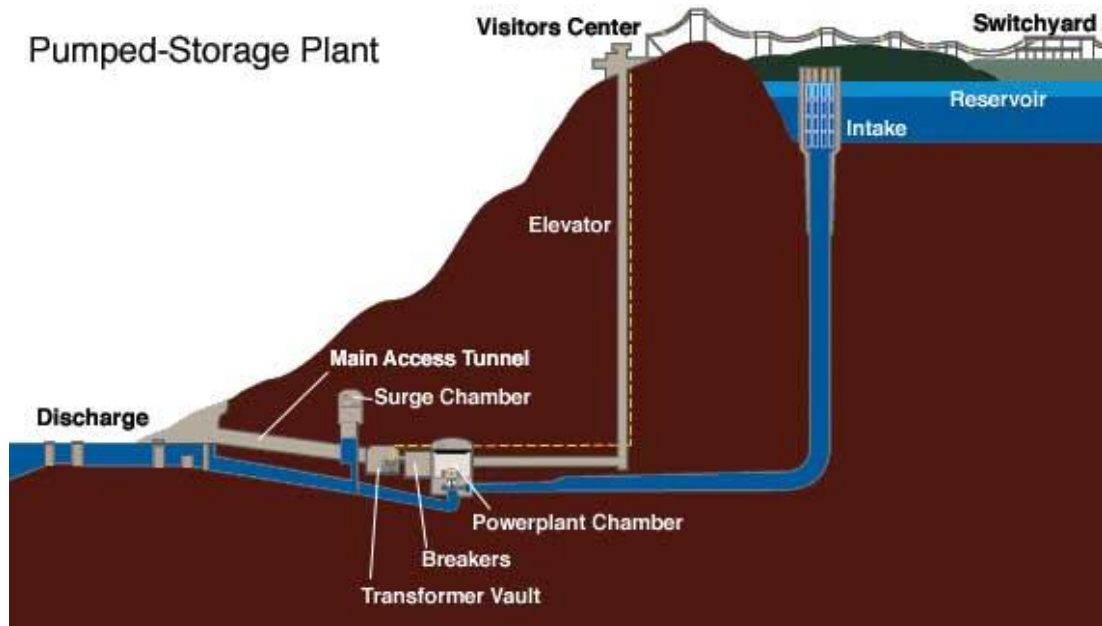
## 4.2 Pumppuvoimalaitos

Pumppuvoimalaitos on vesivoimalla toimiva energiavarasto. Sen tarkoitus on tasata kuormitusta sähkövoimajärjestelmissä. Pumppuvoimalaitoksen toiminta perustuu

veden painovoimaan varastoituneeseen potentiaalienergiaan. Sähkön kysynnän ollessa tuotantoa pienempää, pumpataan vettä voimalaitoksen ala-altaasta yläaltaaseen. Korkean sähkön kysynnän aikaan vesi juoksutetaan yläaltaasta turbiinien läpi ala-altaaseen, jolloin turbiinit tuottavat sähköä. Vaikka veden pumppaaminen käyttääkin sähköä sähköverkosta, on järjestelmän käyttäminen kannattavaa, koska vesi juoksutetaan turbiinien läpi korkean kysynnän aikaan, jolloin sähkön myyntihinta on parhaimmillaan, eli korkea. /14/

Pumppuvoimalaitokset ovat suurin sähköverkon energiavarasto maailmassa. EPRI:n (Electric Power Research Institute) mukaan yli 99 % varastointikapasiteetista toimii pumppuvoimalaitoksien avulla, suuruusluokaltaan n. 127 000 megawattia. /15/

Käännettävä turbiini/generaattori toimii sekä pumppuna, että turbiinina. Yleensä turbiinina käytetään Francis-turbiini-tyyppiä. Lähes kaikki laitokset käyttävät korkeuseron saamiseksi kahta luonnollista eri korkeudella olevaa vesimassaa, tai kahta keinotekoista allasta. Voimalaitoksessa, jossa varastointi perustuu pelkästään pumppaamiseen, vettä vain siirretään paikasta toiseen juoksuttamalla se alas ja pumppaamalla se takaisin yläsäiliöön. Kuva 8 havainnollistaa pumppuvoimalaitoksen toimintaperiaatteen.



Kuva 8. Pumppuvoimalaitoksen rakennekuva. /36/

Ottaen huomioon haihtumis- ja siirtohäviöt, noin 70 – 85 prosenttia veden pumppaamiseen käytetystä sähköenergiasta voidaan saada takaisin. Tekniikka on tällä hetkellä kannattavin menetelmä varastoida suuria määriä sähköenergiaa, mutta kokonaiskustannukset ja oikeanlainen käyttöympäristö ovat pumppuvoimalaitoksen

perustamiselle tärkeimmät ehdot. Pumppaus varastointijärjestelmien suhteellisen alhainen energiatiheys edellyttää joko suuren vesimassan, tai suuren korkeuseron. Ainoa keino voimalan toimimiseksi on varastoida suuri vesimassa niin korkealle, kuin mahdollista, mutta samalla mahdollisimman lähelle toista, alapuolella olevaa aluetta, johon varastoida juoksutettu vesi. Tämä toteutuu joissain voimalaitoksissa ympäristön luonnollisen muodon takia automaattisesti, toisissa taas yksi, tai molemmat vesialtaat ovat keinotekoisia. /16/

Maailmanlaajuisesti vuonna 2011 käytössä oli 126,4 GW pumppuvoimalaitoksilla tuotettavaa sähkön tuotantokapasiteettia. /17/ Se on 9,4prosenttia uusiutuvien energiamuotojen koko sähköntuotannosta /18/, sekä 2,4prosenttia koko maailman sähkön tuotantokapasiteetista /19/. Suurimmat pumppuvoimalaitokset sijaitsevat Yhdysvalloissa, Kiinassa ja Japanissa. Suurin on ”Bath County Pumped storage station” Yhdysvalloissa ja sen teho on reilut 3000 MW. /20/ Euroopan suurin pumppuvoimalaitos löytyy Venäjältä Moskovasta, jossa sijaitsee Zagorskin pumppuvoimalaitos. Se on suuruudeltaan 1200 MW + 800MW. /21/

#### 4.3 Paineilmavarasto (CAES)

Paineilmavarasto (Compressed Air Energy Storage) on pumppuvoimalaitosten ohella toinen tapa säilöä suuria määriä sähköenergiaa. Paineilmavarastoinnin periaate on se, että varastoidaan paineilmaa silloin, kun sen tuottaminen on edullista. Toisin sanoen edullisen sähkön hinnan aikaan, tai mikäli paineilmaa tuottava kompressorin käyttää tuulivoimalla tuotettua sähköenergiaa, niin tuulisella säällä. Tuulisella säällä tuulimylly tuottaa kompressorille sähköä, jolloin ilmaa puristetaan korkeaan paineeseen, ja johdetaan se paineilmavarastoon. Sähkön hinnan ollessa korkealla, eli sähkön kulutuksen ollessa suurta, annetaan varastossa olevan paineistetun ilman paisua turbiiniin läpi, sähköä tuottaen. CAES-järjestelmän etu pumppuvoimalaitokseen nähden on sen vapaampi sijoitettavuus. /22/

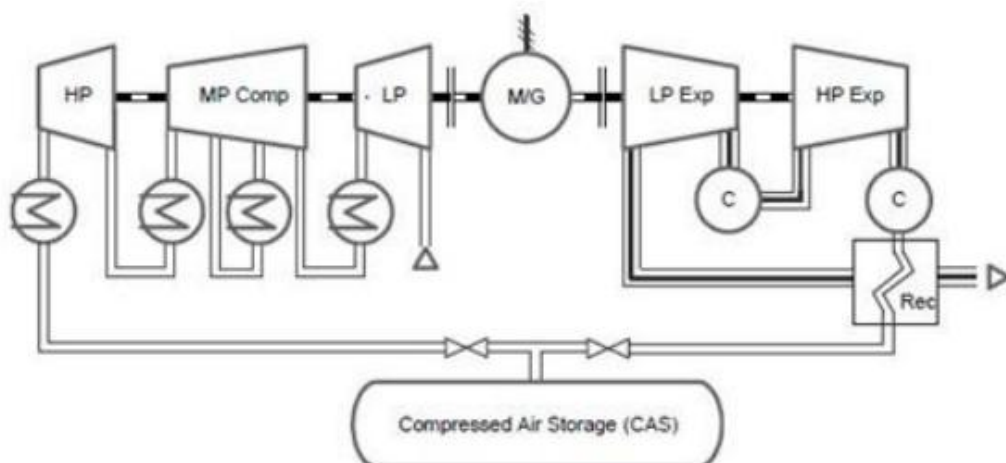
##### 4.3.1 Kaupallisen käytön laitokset

Maailmalla kaupallisessa käytössä tällä hetkellä on kaksi CAES-laitosta: Saksan Huntorfissa ja Yhdysvalloissa, Alabamassa McIntoshin voimalaitos. Vuonna 1978

valmistunut Huntorfin voimalaitoksen teho on vuonna 2006 tehdyn turbiinikoneikon parannustyön jälkeen 321 MW. McIntoshin voimalaitos puolestaan valmistui vuonna 1991 ja on teholtaan 110 MW. Molemmat laitokset ovat ns. ensimmäisen sukupolven CAES-laitoksia. ”Sukupolviportaita” on kaikkiaan kolme, joiden merkitys tullaan myöhemmin tässä työssä selvittämään. Molemmat laitokset tuottavat paineilmansa ns. halvan ajan sähköllä, eli paineistavat paineilmavarastonsa sähkön ollessa halpaa. /22/

#### 4.3.2 Laitos-esimerkki

Tässä työssä käytetään esimerkkinä Yhdysvaltojen Alabamassa sijaitsevaa McIntoshin paineilmavoimalaitosta. Laitoksessa ilma puristetaan 75 baarin paineeseen. Jälkijäähdytetty ilma johdetaan varastoon suolakaivokseen, jonka tilavuus on 538 m<sup>3</sup>. Minimipaine varastossa on 46 baaria. Tässä voimalaitostyyppissä käytetään varastointiin vain yhtä suolakaivosta, kun esimerkiksi toisessa edellä mainitussa voimalaitoksessa, Huntorfissa käytetään kahta, jolloin toista varastoa voidaan silti käyttää, kun toinen on poissa käytöstä. Prosessin pakokaasuja käytetään lämmönsiirtimen välityksellä turbiiniin syötettävän ilman esilämmittämiseen. Kuva 9 osoittaa voimalaitoksen yksinkertaistetun prosessikaavion. Vasemmalta lähtien kuvassa on korkeakompressori (HP), keskikompressori (MP) ja matalakompressori (LP). Keskellä on sähkömoottori (M/G), joka toimii myös generaattorina. Moottorin oikealla puolella ovat matala- ja korkeapaineturbiini (LP Exp ja HP Exp). Kumpaakin turbiinia edeltää polttokammiot (C). Rekuperaattori (Rec) suorittaa lämmön talteenoton. Paineilmavarasto (CAS) kuvassa alhaalla. /22/



Kuva 9. McIntoshin voimalaitoksen yksinkertaistettu prosessikaavio. /37/

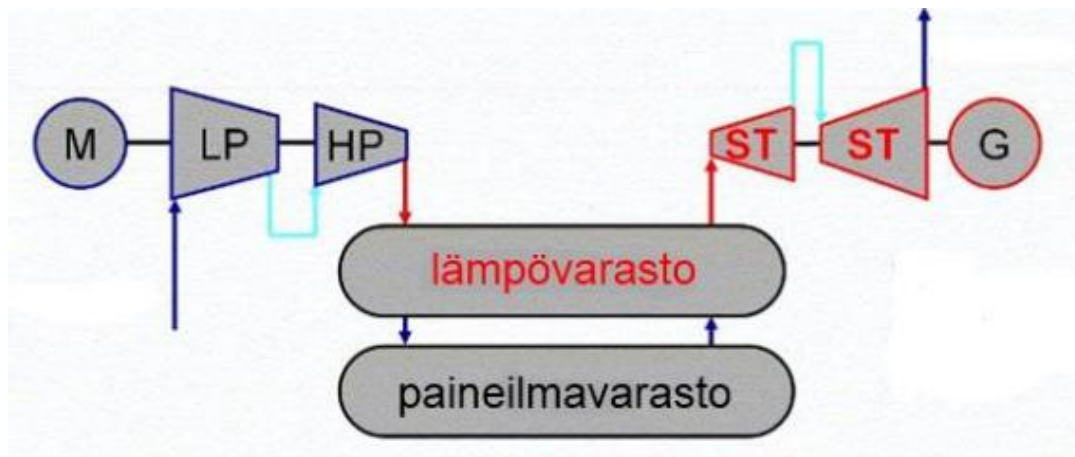
Paineilmavoimalaitoksia rakennetaan eri tarkoituksiin. Esitelty voimalaitos on suunniteltu säätövoimatarkoitukseen. Toinen edellä mainittu, Huntorfin voimalaitos puolestaan on suunniteltu hätä- ja varavoimalaitokseksi. Tästä syystä sen lataus- ja purkautumisajat ovat lyhyemmät, ja teho moninkertainen verrattuna McIntoshin laitokseen. /22/

#### 4.3.3 Eri sukupolvien voimalaitokset.

Esimerkkeinä olleet laitokset ovat ensimmäisen CAES-sukupolven luoneita voimalaitoksia. Toisen sukupolven voimalaitokset ovat paranneltuja malleja ensimmäisestä. Ne tehdään saatavilla olevista standardikomponenteista, jolloin laitoksen rakennuskustannukset tulevat edullisemmiksi, ja laitoksen räätälöinti tiettyä käyttötarkoitusta varten helpottuu. Tämä aiheuttaa myös sen, että toisen polven voimalaitos on myös joustavampi muuttuvien toimintaolosuhteiden ja säädösten suhteen. /22/

Kolmannen sukupolven CAES-laitos eroaa edeltävän sukupolven laitoksesta siten, että turbiiniin menevää ilmaa ei lämmitetä polttoaineen voimalla, vaan tarvittava lämpö otetaan talteen väli- ja jälkijähdytyksellä. Lämpö siirretään takaisin ennen turbiinia. Kuvassa 10 kolmannen sukupolven CAES-laitoksen yksinkertaistettu prosessikaavio. Kuvassa vasemmalta katsoen kompressorikoneikko ja sen sähkömoottori. Oikealla turbiinikoneikko ja sen generaattori. Koneikkojen alapuolella lämpö- ja paineilmavarastot. Puristettu lämmennyt ilma johdetaan lämpövaraston kautta paineilmavarastoon. /22/





Kuva 10. Kolmannen sukupolven COES-laitoksen yksinkertaistettu prosessikaavio. /37/

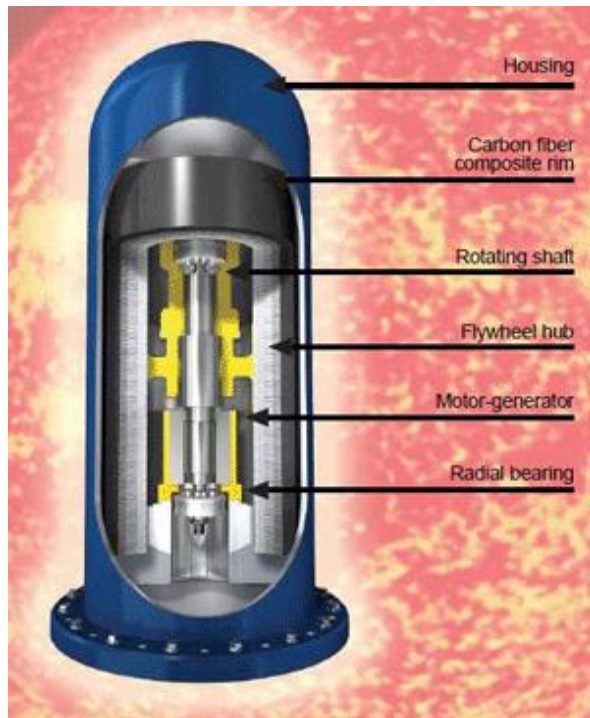
Vuonna 2013 Texasin Gainesiin valmistui ensimmäinen kolmannen sukupolven CAES-laitos. Siinä paineilmaa varastoidaan tuulienergialla. Laitos on suunniteltu siten, että sen teho on muokattavissa tarvetta vastaavaksi 2 MW tehoisia tuulimyllyjä ketjuttamalla. Laitos ei vielä toistaiseksi ole saavuttanut kaupallista käyttöä. /22/

#### 4.4 Vauhtipyörä

Vauhtipyörä koostuu roottorista, moottori-generaattorista, kitkaa mahdollisimman paljon vähentävistä laakereista, sekä suojakuoresta. Vauhtipyörän toimintaperiaate yksinkertaisuudessaan on se, että pyörivän roottorin liike-energia toimii energiavarastona. Moottori/generaattori joko vastaanottaa, tai syöttää energiaa. Vastaanottaessaan energiaa vauhtipyörä laitetaan liikkeeseen sähköenergian avulla, ja syöttäessään energiaa vauhtipyörän liike-energiasta tehdään sähköä.

Vauhtipyörä koostuu erittäin tarkoista komponenteista ja sen hinta on suuri. Vauhtipyörä asetetaan yleensä maan alle, koska rikkoutuessaan se on suojakuorestaan huolimatta vaarallinen. Vauhtipyöriä voidaan käyttää esimerkiksi pienten tuulivoimalla toimivien sähköverkkojen tukena korkean sähkön kulutuksen aikaan. /23/

Kuva 11 havainnollistaa vauhtipyörän rakenteen.



Kuva 11. Vauhtipyörän halkileikkaus. /38/

#### 4.4.1 Velkess-yhtiön tutkimustyö

Vauhtipyöriä on käytetty pitkän aikaa energiavarastoina ja säännöstelytyökaluina, joten niiden kykyä varastoida sähköistä energiaa on jo pidemmän aikaa tutkittu. Kitka on yksi vauhtipyörän ongelmista. Vauhtipyörät, jotka käyttävät mekaanista laakeria, voivat menettää puolet varastoimastaan energiasta kitkan takia kahden tunnin käytön aikana. Ellei vauhtipyörää ole tyhjiössä, pyörivä pyörä saa kitkaa ympäröivästä ilmasta. Magneettiset laakerit ovat lähes kitkattomia, ja toimivat hyvin tyhjiössä, mutta ne tekevät raskaan vauhtipyörän kannattelusta vaikeaa. /24/

Epävakaus on toinen vauhtipyörän ongelmista. Mikä tahansa häiriö voi aiheuttaa vauhtipyörän liikeradalla sen, että se voi horjua hallitsemattomaksi. Häiriöiden skaala voi olla pienestä maanjäristyksestä prekessioon (pyörimisakselin kiertyminen). Kun vauhtipyörä alkaa vaappumaan, se menettää energiaansa, ja on potentiaalinen turvallisuusriski. /24/

Esimerkiksi NASA on tutkinut mahdollisuutta vauhtipyörän käyttämisestä energian varastointiin, mutta kustannuskysymykset tulevat usein muilla tahoilla esteeksi.

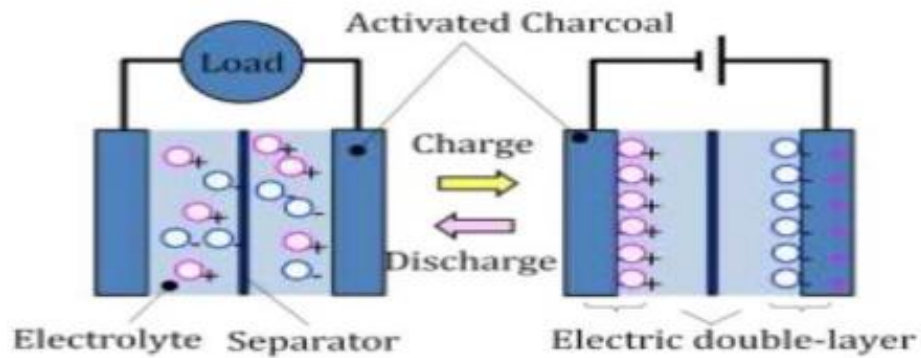
Velkess-yritys yrittää muuttaa tätä käsitystä ja on luonut prototyyppejä vauhtipyörän energian varastointi-järjestelmälle, tarjotakseen plug-and-play-tyyppisen korvaajan tavanomaiselle lyijyakulle. Velkess rakentaa vauhtipyörän prototyyppiä, joka on tarpeeksi pieni jakelutuotannon sovelluksissa. Yksikkö vie tilaa noin jääkaapin leveydeltä. Se olisi kykenevä säilömään 15 000 kilowattituntia energiaa häviten ainoastaan 2 prosenttia varastoituneesta tehostaan kitkan vuoksi päivittäin. Velkess-yhtiön toimitusjohtaja Bill Gray uskoo, että yksikkö voisi olla kilpailukykyinen ja järkevähintainen verrattuna lyijyakkuihin, joiden käyttöikä on huomattavasti lyhyempi. /24/

Velkess on kehitellyt ratkaisua myös epävakaus-ongelmaan kehittämällä taipuisan vauhtipyörän. Ongelmana on se, että prototyyppi on suunniteltu 25paunan (n. 11,34kg) vauhtipyörälle. Halutessaan varastoida 15 000 kilowattituntia, vauhtipyörän tarvitsee olla 750paunan (340,2 kg) kokoinen. Mikäli kyseisestä ongelmasta päästään yli, isot prototyypit on tarkoitus viedä Puerto Ricon ja Oahun kaltaisille saarille, jossa aurinkosähkö on halpaa. Nykyään kyseisissä paikoissa aurinkoenergia säilötään akkuihin, joita on alueella jo liikaa. /24/

Beacon Power avasi vuonna 2011 Stephentowniin, New Yorkiin energiavaraston, joka toimii vauhtipyörällä. Varasto on kooltaan 5MWh. /25/

#### 4.5 Superkondensaattorit

Superkondensaattorissa toimintaperiaate on hyvin samankaltainen, kuin tavallisessa akussa tai tavallisessa kondensaattorissa. Superkondensaattori varastoi energian elektrostaattiseksi energiaksi, jossa on kaksi sähkökenttää. Sen kapasitanssin varastointikapasiteetti on 500 000 kertaa suurempi, kuin tavallisessa kondensaattorissa. Superkondensaattorissa elektrodien välissä on ioneja läpi päästävä erotinkalvo. Sen molemmille puolille syntyy vastakkaiset sähkökentät. Kuva 12 havainnollistaa toimintaperiaatteen.



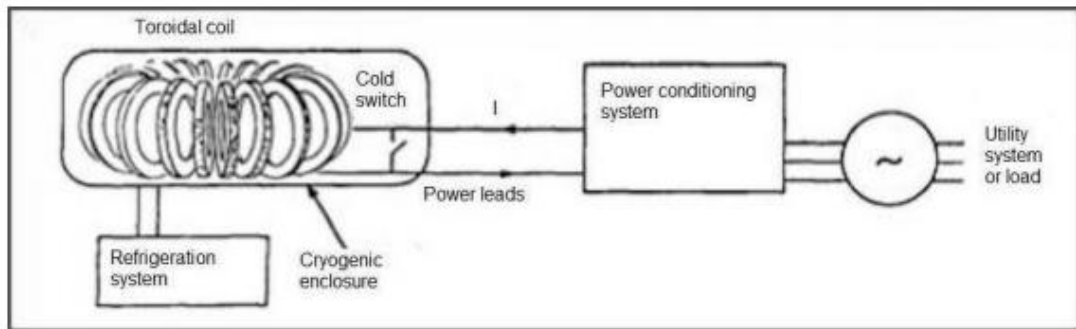
Kuva 12. Superkondensaattorin toimintaperiaate. /11/

Käyttökohde superkondensaattoreille on sellaisissa sovelluksissa, jossa vaaditaan pitkää toimintaikää, huoltovapautta sekä, nopeaa purku- ja latausnopeutta. Tällainen kohde sähköverkossa on esimerkiksi taajuussäätö. Esimerkiksi Havaijilla tuulivoimalan yhteyteen on asennettu taajuutta tehon vaihteluissa säätävä 500kW superkondensaattori. /23/

#### 4.6 Suprajohtava magneettinen energiavarasto (SMES)

Suprajohtavan magneettisen energiavaraston toimintaperiaate on hyvin samanlainen kuin paineilmapuolalaitoksella ja pumppuvoimalaitoksella. Suprajohtavaan käämiin varastoidaan sähköverkosta sähköenergiaa, joka muutetaan vaihtovirrasta tasavirraksi. Suprajohtava käämi ladataan aikana, jolloin sähkön hinta verkossa on halpaa, ja puretaan takaisin suuren kulutuksen aikaan, jolloin sähköllä on korkea hinta. Energiaa voidaan varastoida pitkiksi ajoiksi, koska suprajohtavassa käämissä ei juurikaan ole energiahäviöitä. SMES-järjestelmää voidaan sähköverkossa käyttää erityyppisten häiriöiden tasoittamiseen. Esimerkiksi sähkön taajuuden muunteluun ja sähkön laadun ylläpitoon. /23/

Kuva 13 havainnollistaa SMES:n toimintaperiaatteen. Järjestelmä koostuu pelkistettynä neljästä osasta; suprajohtavasta magneettista, jäähdytysjärjestelmästä, ohjausjärjestelmästä, sekä muuntojärjestelmästä.



Kuva 13 SMES:n toimintaperiaate. /39/

Korkean hyötysuhteen omaava SMES-järjestelmä pystyy vapauttamaan suuren määrän energiaa hyvin nopeasti. Sillä on nopea vaste- ja latausaika, sekä pitkä syklinen ikä. SMES-järjestelmän jäähdyttäminen on järjestelmän suurin kustannuserä. Se vaatii aikaa, ja paljon energiaa. /23/

#### 4.7 Keskittävä aurinkovoima (CSP)

Keskittävän aurinkovoiman (Concentrated Solar Power) toimintaperiaatteena on keskittää auringon säteily useiden peilien avulla yhteen kiintopisteeseen. CSP-tekniikoita on neljä erilaista.

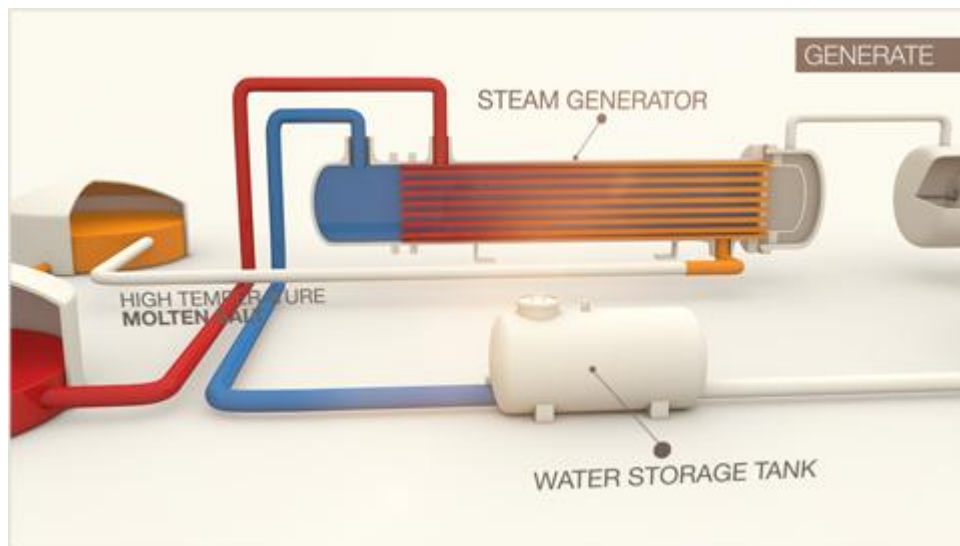
- Paraboloidinen kouru.
- Keskustorni, jossa yhteen pisteeseen heijastetaan auringon säteily peilien avulla.
- Levyjärjestelmät. Ryhmä paraboloidisia levyjä, jossa auringon valo kohdistetaan yhteen kohteeseen.
- Keskittävä aurinkokenno CPV (Concentrated photovoltaics) /26/

Kuvassa 14 Espanjassa, Andalusiassa sijaitseva PlantaSolar 10-aurinkotorni, joka on maailman ensimmäinen kaupallinen aurinkoa keskittävä järjestelmä.



Kuva 14 PlantaSolar 10-aurinkotorniin on suunnattu 624peiliä. /40/

Aurinkotorniin peileillä, heliostaateilla keskitetyt auringonsäteet lämmittävät tornin huipulla olevaa lämmönvaihdinta, jota kutsutaan ”vastaanottajaksi”. Tornin seinissä on putkisto, jossa virtaa nestettä, johon säteiden heijastama lämpöenergia absorboituu. Putkistossa virtaava neste on sulaa suolaa, jota lämmitetään 260-540 Celsius-asteen lämpötilaan. Nestemäinen suola on erinomainen väliaine säilyttää lämpöenergiaa, sillä se säilyttää nestemäisen olomuotonsa vielä yli 540 asteessa. Se mahdollistaa järjestelmän toimimisen alhaisella paineella sopivaan varastointiin. Lämmönvaihtimen jälkeen suola virtaa termisen energian säilytystankkiin, jossa sitä säilytetään korkeapaineistettuna nestemäisenä suolana niin kauan, kunnes sähköä tarvitaan. Kuvassa 15 kuvataan prosessin jatkumista aurinkotornin jälkeen. Tarvittaessa sähköntuotantoa, tuotetaan höyryä ja näin ollen suolaa johdetaan höyrygeneraattoriin, jonne pumpataan vettä vesisäiliöstä. Kun höyryn tuottoon käytetty kuuma nestemäinen suola on ajettu generaattorin läpi, se jäähtyy ja ajetaan kylmän suolan varastointitankkiin. Tankista se ajetaan takaisin aurinkotorniin, ja prosessi jatkaa kiertoaan. /27/



Kuva 15. Keskitetyn aurinkoenergian prosessin komponentit. /27/

Kun höyry on pyörittänyt höyryturbiinia, se kondensoidaan takaisin vedeksi, ja johdetaan takaisin vesitankkiin. Kun sähköä jälleen tarvitaan, prosessin kierto alkaa uudelleen. /27/

Tällä hetkellä keskitetyn aurinkoenergian suosituin keräämismuoto on paraboloidinen kaukalo. CSP-teknologia on runsaassa kasvussa ympäri maailman. Muun muassa Lähi-Idässä ja Pohjois-Afrikassa on osoitettu kiinnostusta CSP-projektille. Espanja on keskitetyn aurinkoenergian hallitseva maa, jossa tuotantotehoa oli tammikuussa 2014 yhteensä 2204 MW. /28/

## 5 YHTEENVETO

Työ oli kokonaisuudessaan haasteellinen ja aikaa vievä, koska opintokokonaisuuden laajuus oli odotettua suurempi. Työn toteuttaminen sujui mielestäni kuitenkin erittäin onnistuneesti, sillä koen saaneeni kokonaisuudessaan paljon uutta informaatiota uusiutuvista energialähteistä, ja niiden tärkeydestä. Työ toi myös uutta yleistietoa energiatuotannosta, sillä esimerkiksi fossiilipolttoaineiden ylivertainen osuus koko maailman energiatuotannossa yllätti. Työ toteutettiin tiedonhakutyönä, jolloin erilaisten tietolähteiden: kirjallisuuden, lehtiartikkeleiden, opinnäytetöiden ja tietosanakirjojen käyttö tuli todella tutuksi. Lisäksi tiedon kääntäminen ja

sisäistäminen vieraalta kieleltä ymmärrettäväksi, selkokieliseksi suomen kieleksi toi omat haasteensa.

Toivon, että tekemästäni työstä lukija saa ainakin yleiskuvan uusiutuvien energialähteiden termisen ja sähköisen energian varastoinnin eri muodoista. Aiheen tärkeys ja ajankohtaisuus tekivät työn tekemisestä todella mielekkään kokemuksen. Uskon, että tämän työn pohjalta lukija voi esimerkiksi saada vinkin omaan päättötyöhönsä, vaikkapa tarkastelemalla yksityiskohtaisemmin jotain, tai joitain aiheita. Lopuksi haluan kiittää ohjaavaa opettajaani Petteri Pulkista mielenkiintoisesta opinnäytetyön aiheesta. Uskon, että tästä opintokokonaisuudesta on tulevaisuudelleni valtaisa hyötyä.



## Lähteet

/1/ Laitinen, J. 2012. Valomerkki Energiapula ja makean elämän loppu. Atena. s 20.

/2/ Laitinen, J. 2012. Valomerkki Energiapula ja makean elämän loppu. Atena. s 10-48.

/3/ Wikipedia - Vapaan tietosanakirjan www-sivut. 2014. Viitattu 12.04.2014.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Seasonal\\_thermal\\_energy\\_storage](http://en.wikipedia.org/wiki/Seasonal_thermal_energy_storage)

/4/ Laughlin R. 2013. Kotisivut. Viitattu 25.04.2014

<http://large.stanford.edu/courses/2013/ph240/lim1/>

/5/ Wikipedia - Vapaan tietosanakirjan www-sivut 2014. Viitattu 30.04.2014.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Seasonal\\_thermal\\_energy\\_storage#STES\\_technologies](http://en.wikipedia.org/wiki/Seasonal_thermal_energy_storage#STES_technologies)

/6/ Drake Landing Solar Communityn www-sivut. 2014. Viitattu 03.05.2014.

<http://www.dlsc.ca/borehole.htm>

/7/ Drake Landing Solar Communityn www-sivut. 2014. Viitattu 03.05.2014

<http://www.dlsc.ca/how.htm>

/8/ Laughlin, R. 2013. Kotisivut. s.3-4. Viitattu 03.05.2014.

[http://large.stanford.edu/courses/2013/ph240/lim1/docs/UTES\\_Nordell.pdf](http://large.stanford.edu/courses/2013/ph240/lim1/docs/UTES_Nordell.pdf)s

/9/ JENERGIA-verkkolehti. 2013. Viitattu 20.05.2014.

<http://www.jenergialehti.fi/index2.php?id=12&articleId=296&type=4>

/10/ Harris, M. 2011. Verkkodokumentti. s.25-26. Viitattu 20.05.2014.

<https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=2174449&fileId=2174452>

/11/ Seppänen, J. 2014. Verkkodokumentti. s.14, 15, 16, 19. Viitattu 01.06.2014.

[http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/74282/Seppanen\\_Juha.pdf?sequence=](http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/74282/Seppanen_Juha.pdf?sequence=1)

/12/ Wikipedia - Vapaan tietosanakirjan www-sivut 2014. Viitattu 01.06.2014.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium%E2%80%93sulfur\\_battery#Electricity\\_storage\\_for\\_grid\\_support](http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium%E2%80%93sulfur_battery#Electricity_storage_for_grid_support)

/13/ CO2-verkkolehti. 2014. Viitattu 07.06.2014. [http://www.co2-raportti.fi/index.php?page=ilmastouutisia&news\\_id=4096](http://www.co2-raportti.fi/index.php?page=ilmastouutisia&news_id=4096)

/14/ Wikipedia - Vapaan tietosanakirjan www-sivut 2014. Viitattu 07.06.2014.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Pumped-storage\\_hydroelectricity](http://en.wikipedia.org/wiki/Pumped-storage_hydroelectricity)

/15/ The Economist – Uutissivuston www-sivut. 2012. Viitattu 07.06.2014.  
<http://www.economist.com/node/21548495?frsc=dg%7Ca>

/16/ Wikipedia - Vapaan tietosanakirjan www-sivut 2014. Viitattu 15.06.2014.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Pumped-storage\\_hydroelectricity#Overview](http://en.wikipedia.org/wiki/Pumped-storage_hydroelectricity#Overview)

/17/ U.S. Energy Information Administration www-sivut. 2014. Viitattu 30.06.2014.  
<http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=2&pid=82&aid=7&cid=regions&syid=2004&eyid=2011&unit=MK>

/18/ U.S. Energy Information Administration www-sivut. 2014. Viitattu 30.06.2014.  
<http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=2&pid=29&aid=7&cid=regions&syid=2004&eyid=2011&unit=MK>

/19/ U.S. Energy Information Administration www-sivut. 2014. Viitattu 30.06.2014.  
<http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=2&pid=2&aid=7&cid=regions&syid=2004&eyid=2011&unit=MK>

/20/ Wikipedia - Vapaan tietosanakirjan www-sivut. 2014. Viitattu 07.07.2014.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Pumped-storage\\_hydroelectricity#Worldwide\\_use](http://en.wikipedia.org/wiki/Pumped-storage_hydroelectricity#Worldwide_use)

/21/ Wikipedia - Vapaan tietosanakirjan www-sivut. 2014. Viitattu 07.07.2014.  
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Pumppuvoimalaitos>

/22/ Lääti, I. Verkkodokumentti. 2013. Viitattu 01.08.2014.

[https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/94072/Kandidaattinty%C3%B6\\_likka\\_L%C3%A4ti.pdf?sequence=2](https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/94072/Kandidaattinty%C3%B6_likka_L%C3%A4ti.pdf?sequence=2) s.6, 9, 11, 12, 14, 20, 21

/23/ Seppänen, J. Verkkodokumentti. 2014. s. 10,11,12,16,17,18,19. Viitattu 01.08.2014.

[http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/74282/Seppanen\\_Juha.pdf?sequence=1](http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/74282/Seppanen_Juha.pdf?sequence=1)

/24/ KCET-uutissivuston www-sivut. 2014. Viitattu 01.10.2014.

<http://www.kcet.org/news/rewire/technology/a-new-spin-on-renewable-energy-storage.html>

/25/ Wikipedia - Vapaan tietosanakirjan www-sivut. 2014. Viitattu 05.10.2014.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel\\_energy\\_storage#Grid\\_energy\\_storage](http://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel_energy_storage#Grid_energy_storage)

/26/ Wikipedia - Vapaan tietosanakirjan www-sivut. 2014. Viitattu 05.10.2014.

[http://fi.wikipedia.org/wiki/Keskitt%C3%A4v%C3%A4\\_aurinkovoima](http://fi.wikipedia.org/wiki/Keskitt%C3%A4v%C3%A4_aurinkovoima)

/27/ SolarReserve-yrityksen www-sivut. 2014. Viitattu 10.10.2014.

<http://www.solarreserve.com/what-we-do/csp-technology/>

/28/ Wikipedia - Vapaan tietosanakirjan www-sivut. 2014. Viitattu 15.10.2014.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated\\_solar\\_power](http://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated_solar_power)

## KUVALÄHTEET

/29/ Laitinen, J. 2012. Valomerkki Energiapula ja makean elämän loppu. Atena. s 21.

/30/ Simon Fraser University. www-sivut. 2014. Viitattu 15.11.2014.

<http://www.sfu.ca/personal/dallen/ATES.html>

/31/ Wikipedia - Vapaan tietosanakirjan www-sivut. 2014. Viitattu 15.11.2014.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal\\_heat\\_pump#Seasonal\\_thermal\\_storage](http://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_heat_pump#Seasonal_thermal_storage)

/32/ Drake Landing Solar Communityn www-sivut. 2014. Viitattu 15.11.2014.

<http://www.dlsc.ca/borehole.htm>

/33/ Drake Landing Solar Communityn www-sivut. 2014. Viitattu 15.11.2014.

<http://www.dlsc.ca/how.htm>

/34/ Harris, M. Verkkodokumentti. 2011. s26. Viitattu 15.11.2014.

<https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=2174449&fileId=2174452>

/35/ CO2-verkkolehti. 2014. Viitattu 18.11.2014. <http://www.co2->

[raportti.fi/index.php?page=ilmastouutisia&news\\_id=4096](http://www.co2-raportti.fi/index.php?page=ilmastouutisia&news_id=4096)

/36/ Wikipedia - Vapaan tietosanakirjan www-sivut. 2014. Viitattu 18.11.2014.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Pumped-storage\\_hydroelectricity#mediaviewer/File:Pumpstor\\_racoon\\_mtn.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/Pumped-storage_hydroelectricity#mediaviewer/File:Pumpstor_racoon_mtn.jpg)

/37/ Lääti, I. Verkkodokumentti. 2013. s.12, 20. Viitattu 18.11.2014.

[https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/94072/Kandidaatinty%C3%B6\\_likka\\_L%C3%A4%C3%A4ti.pdf?sequence=2](https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/94072/Kandidaatinty%C3%B6_likka_L%C3%A4%C3%A4ti.pdf?sequence=2)

/38/ The Phoenix Sun. Internet-blogi. 2014. Viitattu 18.11.2014.

<http://thephoenixsun.com/archives/10816>

/39/ Virtanen, L. 2009. Verkkodokumentti. s.11. Viitattu 25.04.2014.

[http://www2.physics.utu.fi/projects/kurssit/UFYS2100/muuta/Luk\\_Virtanen.pdf](http://www2.physics.utu.fi/projects/kurssit/UFYS2100/muuta/Luk_Virtanen.pdf)

/40/ Wikipedia - Vapaan tietosanakirjan www-sivut. 2014. Viitattu 18.11.2014.

[http://fi.wikipedia.org/wiki/Keskitt%C3%A4v%C3%A4\\_aurinkovoima#mediaviewer/File:PS10\\_solar\\_power\\_tower.jpg](http://fi.wikipedia.org/wiki/Keskitt%C3%A4v%C3%A4_aurinkovoima#mediaviewer/File:PS10_solar_power_tower.jpg)